



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## Elementær laboratoriepraktik for bygningsingeniørstuderende

Burcharth, Hans F.; Larsen, Torben

*Publication date:*  
1972

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*  
Burcharth, H. F., & Larsen, T. (1972). *Elementær laboratoriepraktik for bygningsingeniørstuderende*. Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning. Bulletin Nr. 2

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



**BULLETIN NR. 2**

H. F. BURCHARTH OG TORBEN LARSEN  
**ELEMENTÆR LABORATORIEPRAKTIK  
FOR BYGNINGSINGENIØRSTUDERENDE**

**LABORATORIET FOR HYDRAULIK OG HAVNEBYGNING**  
DANMARKS INGENIØRAKADEMI DANMARKSGADE 19 9000 AALBORG DANMARK

DK: 061.6:532

371.315.7:532

DANMARKS INGENIØRAKADEMI

Danmarksgade 19

9000 Aalborg

Danmark

telefon (08) 160533

LABORATORIET FOR HYDRAULIK OG HAVNEBYGNING

Ingeniørdocent H. F. Burcharth

BULLETIN NR. 2

ELEMENTÆR LABORATORIEPRAKTIK FOR BYGNINGSINGENIØRSTUDERENDE

APRIL 1972

INDHOLDSFORTEGNELSE:

Studiemæssig baggrund for laboratoriepraktik	side 0.1
Laboratorieøvelse nr. 1 Rørstrømning	side 1.1
Laboratorieøvelse nr. 2 Kanalstrømning	side 2.1
Laboratorieøvelse nr. 3 Regelmæssige bølger	side 3.1
Laboratorieøvelse nr. 4.1 Enkeltmodstand	side 4.1
Laboratorieøvelse nr. 4.2 Hydraulisk spring	side 4.2
Laboratorieøvelse nr. 4.3 Regelmæssige bølgers refraktion	side 4.3
Vurdering	side 5.1

### Studiemæssig baggrund for laboratoriepraktik.

I studieplanen for akademiingeniørstuderende er det fastlagt, at studerende i 3. semester (3. halvår) skal deltage i et grundkursus i laboratoriepraktik af 48 timers varighed.

Kurset har til formål på tværfaglig basis at give de studerende et praktisk kendskab til eksperimentel arbejdsmetode, herunder vurdering af måleresultater samt rapportering af en undersøgelses resultater. Der sigtes ikke mod at give den studerende et fuldstændigt overblik over måleteknik i almindelighed, men derimod ved behandling af nogle afgrænsede områder at give et indtryk af den eksperimentelle arbejdsmetodes problematik.

Kursets indhold udformes fra år til år ved samarbejde mellem fagene efter afdelingsrådets nærmere bestemmelser. Det kan enten udformes som en obligatorisk del (omfattende en gennemgang af teorien for måleusikkerhed samt laboratorieøvelser med tilhørende behandling af måleresultater og vurdering af forsøgsresultater) og en valgfri del (omfattende en række eksperimentelle undersøgelser inden for et eller flere af bygningsingeniørens arbejdsområder), eller det kan udformes som en række valgfri, tværfagligt opbyggede øvelsesprogrammer, hvorefter den enkelte studerende vælger sit specielle program og får lejlighed til at gennemprøve de målemetoder, som måtte være relevante for den valgte opgave.

For efterårssemestret 1971 blev det besluttet, at samtlige studerende skulle deltage i et obligatorisk laboratoriekursus bestående af 20 timer fysikøvelser. I de resterende 28 timer kunne de studerende frit vælge øvelser indenfor 4 forskellige fag. herunder faget Vandbygning (hydraulik, havnebygning, kulturteknisk vandbygning).

14 studerende (svarende til 25%) valgte at deltage i vandbygningsfagets øvelsesprogram, som bestod af 4 forskellige laboratorieøvelser, hver af 4 timers varighed (incl. rapportskrivning). Øvelsernes emner faldt hovedsagelig indenfor den elementære hydraulik, medens en mindre del omhandlede elementær bølgehydraulik.

Som øvelsesgrundlag fik de studerende udleveret en vejledning, hvor fremgangsmåden ved øvelsernes udførelse samt den tilhørende teoretiske baggrund var beskrevet, jfr. redegørelsen i de følgende afsnit. De studerendes eneste opgave var derfor at udføre og bearbejde målingerne samt at give en afsluttende kommentar om forsøget.



Det kan synes lidet pædagogisk at arbejde ud fra så håndfast et oplæg. At denne fremgangsmåde alligevel kan være forsvarlig, skyldes dels at der er meget kort tid til rådighed, dels at øvelsernes formål ikke primært er at give en indlæring af det til øvelserne knyttede stof, men derimod at give de studerende indsigt i nogle af de eksperimentelle arbejds- og målemetoder, som anvendes i laboratorierne.

De studerendes faglige baggrund for øvelserne er et kursus i 2. semester indeholdende 67 forelæsninger om elementær hydraulik og hydrostatik. Kursets emner og niveau svarer nøje til fremstillingen i F.A. Engelund "Lærebog i hydraulik". Den Private Ingeniørfond, Danmarks tekniske Højskole, 1969.

DANMARKS INGENIØRAKADEMI  
Bygningsafdelingen  
Aalborg

Laboratoriet for  
Hydraulik og Havnebygning

ØVELSEN UDFØRT DATO .....

RAPPORT AFLEVERET DATO .....

NAVN STUDIENUMMER

.....

Laboratoriepraktik 3. halvår

.....

### Laboratorieøvelse nr. 1. Rørstrømning

Øvelsens formål:

At måle tryktabet i en ensformig, stationær rørstrømning som funktion af middelhastigheden i røret og herefter beregning af friktionstallet  $f$  som funktion af Reynolds tal.

### Måleopstillingen

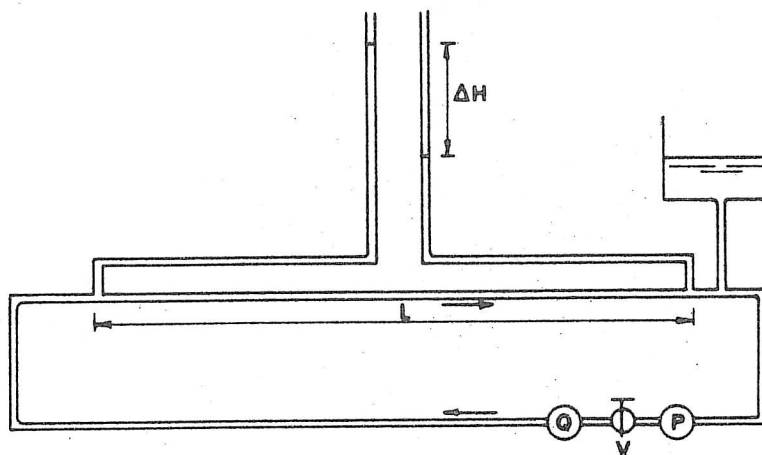


fig. 1 Principskitse af opstilling. Q vandfølingsmåler, V ventil, P pumpe.

Teoretisk grundlag (se F. A. Engelund "Lærebog i Hydraulik" pag. 73-80).  
Ud fra modellove og ligevægtsbetragtninger kan energitabet i en rørstrømning udtrykkes ved

$$\frac{\Delta H}{L} = I = f \frac{V^2}{2g} \frac{1}{R} \quad (1)$$

Da strømmingen er ensformig, er energitabet  $\Delta H$  lig tryktabet  $\Delta(\frac{P}{\gamma})$ . Formel (1) kan herefter omskrives til

$$f = \frac{\Delta H}{L} \frac{2g R}{V^2}$$

$$\text{Reynolds tal: } Re = \frac{V R}{\nu}$$

$\Delta H$  energitabet

$\Delta P$  tryktabet

$L$  afstanden mellem trykudtagene

$f$  friktionstal

$V$  middelhastigheden i røret

$g$  9,81 m/sec<sup>2</sup>

$R$  hydraulisk radius

$\nu$  væskens kinematiske viskositet (se tabel i "Lærebog i Hydraulik")

$k$  den ækvivalente sandruhed



DANMARKS INGENIØRAKADEMI  
Bygningsafdelingen  
Aalborg

Laboratoriet for  
Hydraulik og Havnebygning

ØVELSEN UDFØRT DATO .....

RAPPORT AFLEVERET DATO .....

NAVN STUDIENUMMER

.....

Laboratoriepraktik 3. halvår

.....

## Laboratorieøvelse nr. 2. Kanalstrømning

Øvelsens formål:

At måle hastighedsprofilen i en stationær, plan og ensformig kanalstrømning i det såkaldte ru tilfælde, samt beregne bundforskydningsspænding, den ækvivalente sandruhed, von Karmans tal og Manningtallet.

### Opstilling og instrumenter

Laboratoriets rende og selvkørende målevogn.

Mikropropel med forstærker og elektronisk tæller.

Skydelære, målebånd, stopur.

Teoretisk grundlag (se F. A. Engelund "Lærebog i Hydraulik" pag. 83-95).

#### 1. Hastighedsprofilen

Hastighedsprofilen kan antages at være logaritmisk,

$$\frac{U}{U_F} = 8,5 + 5,75 \log \frac{z}{k} \quad \text{eller} \quad \frac{U}{U_F} = 5,75 \log \frac{30z}{k}.$$

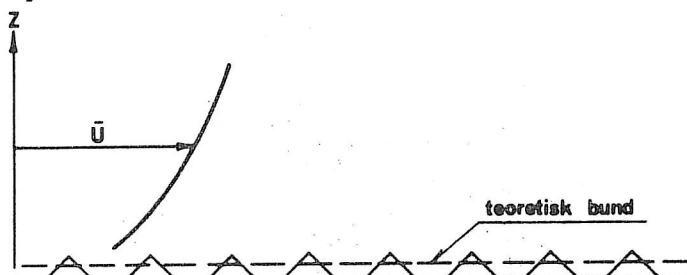


fig. 2.1-1

D vanddybden

U øjeblikkelig hastighed i målepunktet

$\bar{U}$  middelhastigheden i målepunktet

V middelhastigheden over dybden

$U_F$  friktionshastigheden,  $U_F = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$

z højden over den teoretiske bund, 0-punktet bestemmes ud fra den logaritmiske hastighedsprofil

k den ækvivalente sandruhed (forskellig fra højden af ruhedselementerne)

$\tau$  bundforskydningsspændingen

$\rho$  vandets massetæthed

#### 2. Den nødvendige måletid t (se evt. I.G. Jonsson "On turbulence in open channel flow").

På grund af hastighedsfluktuationerne i den turbulente strømning er det nødvendigt at måle middelhastigheden over et længere tidsrum for at få denne bestemt med en rimelig nøjagtighed.



Den nødvendige måletid kan bestemmes udfra

$$t = \alpha \frac{VD}{s(t)^2} \quad (1)$$

$t$  måletiden

$\alpha$  ukendt koefficient

$s(t)$  standardafvigelsen på  $U$ , svarende til måletiden  $t$ .

### Øvelsens forløb

#### 1. Kalibrering af propel.

Propellen kalibreres med målevogn for hastighedsområdet 0-60 cm/sec. Sammenhængen mellem frekvens og hastighed optegnes på millimeterpapir.

#### 2. Bestemmelse af den nødvendige måletid $t$ .

Der foretages mindst 10 målinger med henholdsvis 10 sec., 30 sec. og 100 sec. måletid. Gennemsnit og standardafvigelser beregnes og den nødvendige måletid fastsættes således, at propellen udnyttes bedst muligt under hensyntagen til kalibreringen.

#### 3. Måling af hastighedsprofil.

Der ønskes foretaget 1 måling med ca. 25 cm vanddybde og en middelhastighed på 50-60 cm/sec. Der måles 1,5 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 12 cm, 16 cm og 24 cm over ruhedselementerne.

Samtidig med måling af hastighedsprofilet, måles faldet på energilinen I ved hjælp af trykudtagene i bunden af renden.

Resultaterne afbildes på enkeltlogaritmisk millimeterpapir. Ved at ændre på 0-punktet på z-aksen findes den bedste tilnærmelse til en ret linie.

Herefter beregnes  $U_F$  og  $k$  udfra det logaritmiske hastighedsprofil.

### Forventes afleveret

1. Kalibreringskurve for propel.
2. Hastighedsprofiler optegnes på almindelig millimeterpapir og på enkeltlogaritmisk millimeterpapir.
3. Beregning af  $U_F$ ,  $\tau$ ,  $k$ ,  $K$  (v. Karmans tal),  $M$  (Manningtallet) udfra målingerne af hastighedsprofilet.
4. Beregning af  $\tau$  udfra måling af I.
5. Kommentarer til måleresultaterne og evt. til måleopstillingen.

Beregningskema.

Bestemmelse af den nødvendige måletid.

$$t = \alpha \frac{VD}{s(t)^2} \quad s(t) = \sqrt{\frac{\sum (\bar{U} - U_i)^2}{P-1}}$$

t = sec

n pulser	U cm/sec	$\bar{U} - U$ cm/sec	$(\bar{U} - U)^2$ cm <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>
$\Sigma U =$		$\Sigma (\bar{U} - U)^2 =$	

V =

s(t) =

D =

 $\alpha$  =

t = sec

n pulser	U cm/sec	$\bar{U} - U$ cm/sec	$(\bar{U} - U)^2$ cm <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>
$\Sigma U =$		$\Sigma (\bar{U} - U)^2 =$	

V =

s(t) =

D =

 $\alpha$  =

t = sec

n pulser	U cm/sec	$\bar{U} - U$ cm/sec	$(\bar{U} - U)^2$ cm <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>
$\Sigma U =$		$\Sigma (\bar{U} - U)^2 =$	

V =

s(t) =

D =

 $\alpha$  =



DANMARKS INGENIØRAKADEMI  
Bygningsafdelingen  
Aalborg

Laboratoriet for  
Hydraulik og Havnebygning

ØVELSEN UDFØRT DATO .....

RAPPORT AFLEVERET DATO .....

NAVN STUDIENUMMER

.....

Laboratoriepraktik 3. halvår

.....

### Laboratorieøvelse nr. 3. Regelmæssige bølger

Øvelsens formål:

1. At undersøge regelmæssige vandbølgers hastighed som funktion af bølgelængden og vanddybden samt at sammenholde disse måleresultater med de teoretiske udtryk.
2. At undersøge sammenhængen mellem regelmæssige bølgers maksimale højde som funktion af bølgelængde og vanddybde.
3. At foretage en visuel observation af bølgeformens afhængighed af bølgehøjden, bølgelængden og vanddybden.

Teoretisk grundlag (se evt. H.F. Burcharth og Torben Larsen "Noter til bølgehydraulik").

#### 1. Bølgehastigheden

På grundlag af potentialteorien (ideale væsker) kan regelmæssige bølgers udbredelseshastighed  $C$  beregnes til

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi D}{L}\right)}. \quad (1)$$

$g$  tyngdeaccelerationen,  $9,81 \text{ m/sec}^2$

$L$  bølgelængden

$D$  vanddybden

I grænsetilfældet  $\frac{D}{L} \rightarrow 0$ , d.v.s. for fladvandsbølger, er grænseværdien for (1)

$$C = \sqrt{gD}. \quad (2)$$

For  $\frac{D}{L} \rightarrow \infty$ , d.v.s. for bølger på dybt vand, er grænseværdien

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}. \quad (3)$$

#### 2. Den maksimale bølgehøjde

Teoretisk kan den maksimale bølgehøjde beregnes til

$$H = 0,142 L \tanh\left(\frac{2\pi D}{L}\right). \quad (4)$$

Grænsetilfældet  $\frac{D}{L} \rightarrow 0$  medfører

$$H = 0,8D, \quad (5)$$

og grænsetilfældet  $\frac{D}{L} \rightarrow \infty$  medfører

$$H = 0,142L. \quad (6)$$



### 3. Bølgeformen

Størrelsen af de lodrette komponenter af inertikræfterne for de vædskepartikler som befinder sig i overfladen afhænger af forholdet mellem bølgehøjden og bølgelængden samt af forholdet mellem bølgelængden og vanddybden. Dette medfører, at bølgeformen er forskellig for forskellige værdier af disse forhold. En nøjere teoretisk begrundelse skal ikke gives her.

Vedlagte bølgetabel kan benyttes.

### Øvelsens forløb

1. Kalibrering af bølgemåler.  
Bølgemåleren hæves eller sænkes en kendt afstand (f.eks. 10 cm), og ændringen i udslaget på oscilloscopet aflæses. Herefter omregnes de på oscilloscopet aflæste bølgehøjder til virkelige bølgehøjder. Det kan med god tilnærmelse antages, at bølgemåleren er lineær i hele måleområdet.
- 2.0 Der indledes nu med en vanddybde på ca. 30 cm. Ved at variere bølgemaskinens frekvens  $f$ , kan bølgelængden  $L$  varieres. For bølgelængder på ca. 15, 30, 50, 100, 150 og 200 cm foretages følgende:
  - 2.1 Måling af bølgehastigheden  $C$ .  
Der måles sammenhørende værdier af  $L$  og  $f$ , og  $C$  beregnes som  $C = Lf$ .  $f$  aflæses på den funktionsgenerator, som styrer bølgemaskinen.  $L$  måles ved at placere to bølgemålere med en bølgelængdes afstand, hvilket kontrolleres ved, at fasen er den samme ved de to bølgemålere.
  - 2.2 Måling af den maksimale bølgehøjde.  
Uden at ændre bølgelængden, forøges bølgehøjden indtil bølgerne lige netop bryder i toppen, og herefter aflæses bølgehøjden.
  - 2.3 Observation af bølgeformen.  
Stadig uden at ændre bølgelængden, varieres bølgehøjden, og bølgeformen observeres direkte og på oscilloscopet. Der tegnes skitser heraf.

Herefter reduceres vanddybden i bassinet til ca. 10 cm, og ovennævnte målinger gentages (incl. kalibrering af bølgemåler).

### Forventes afleveret

1. En grafisk afbildning af de på bilag 1 angivne målte og teoretisk bestemte størrelser.
2. En vurdering af gyldighedsområderne for tilnærmelsesformlerne (2), (3), (5) og (6).
3. Kommenterede skitser af bølgeformen.
4. Generelle kommentarer til målemetode og resultater.

Vanddybden  $D =$

og bølgehøjden  $H =$

giver oscilloscopudslag OSC =

aflysninger		beregnet	teoretiske værdier		
$f$ sec <sup>-1</sup>	L m	C m/s	C(1) m/s	C(2) m/s	C(3) m/s

af læsn.		beregnet		teoretiske værdier		
max. OSC cm	H cm			H(4) cm	H(5) cm	H(6) cm

Vanddybden  $D =$

og bølgehøjden  $H =$

giver oscilloscopudslag OSC =

aflysninger		beregnet	teoretiske værdier		
$f$ sec <sup>-1</sup>	L m	C m/s	C(1) m/s	C(2) m/s	C(3) m/s

[illegible]

$\frac{D}{L_0}$	$\frac{D}{L}$	$\frac{2\pi D}{L}$	$\sinh \frac{2\pi D}{L}$	$\cosh \frac{2\pi D}{L}$	$\tanh \frac{2\pi D}{L}$	3.4
0.00	0.0000	0.000	0.000	1.00	0.000	
01	0403	253	256	03	248	
02	0576	362	370	07	347	
03	0714	448	463	10	420	
04	0833	523	548	14	480	
0.05	0.0942	0.592	0.627	1.18	0.531	
06	104	655	703	22	575	
07	114	716	778	27	614	
08	123	774	854	31	649	
09	132	831	0.930	36	681	
0.10	0.141	0.886	1.01	1.42	0.709	
11	150	940	08	48	735	
12	158	0.994	16	54	759	
13	166	1.05	25	60	780	
14	175	10	33	67	800	
0.15	0.183	1.15	1.42	1.74	0.818	
16	192	20	52	82	835	
17	200	26	61	90	850	
18	208	31	72	1.99	864	
19	217	36	82	2.08	877	
0.20	0.225	1.41	1.94	2.18	0.888	
21	234	47	2.06	28	899	
22	242	52	18	40	909	
23	251	58	31	52	918	
24	259	63	45	65	926	
0.25	0.268	1.68	2.60	2.78	0.933	
26	277	74	76	2.93	940	
27	285	79	2.92	3.09	946	
28	294	85	3.10	25	952	
29	303	90	28	43	957	
0.30	0.312	1.96	3.48	3.62	0.961	
31	321	2.02	69	3.83	965	
32	330	08	3.92	4.04	969	
33	339	13	4.16	28	972	
34	349	19	41	52	975	
0.35	0.358	2.25	4.68	4.79	0.978	
36	367	31	4.97	5.07	980	
37	377	37	5.28	37	982	
38	386	42	61	5.70	984	
39	396	48	5.96	6.04	986	
0.40	0.405	2.54	6.33	6.41	0.988	
41	414	60	6.72	6.80	989	
42	424	66	7.15	7.22	990	
43	434	72	7.60	7.66	991	
44	443	79	8.08	8.14	992	
0.45	0.453	2.85	8.58	8.64	0.993	
46	463	91	9.13	9.19	994	
47	472	2.97	9.71	9.76	995	
48	482	3.03	10.3	10.4	995	
49	492	09	11.0	11.0	996	
0.50	0.502	3.15	11.7	11.7	0.996	

DANMARKS INGENIØRAKADEMI  
Bygningsafdelingen  
Aalborg

Laboratoriet for  
Hydraulik og Havnebygning

ØVELSEN UDFØRT DATO .....

RAPPORT AFLEVERET DATO .....

NAVN STUDIENUMMER

.....

Laboratoriepraktik 3. halvår

.....

#### Laboratorieøvelse nr. 4.1. Enkeltmodstand

Øvelsens formål:

At bestemme modstandstallet  $\zeta$  for en ventil.

Teoretisk grundlag (se F.A. Engelund "Lærebog i Hydraulik" pag. 106-114).  
Ved turbulente rørstrømninger kan energitabet  $\Delta H$  ved ventiler, normalt opfattes som en enkeltmodstand,  $\Delta H = \zeta \frac{V^2}{2g}$ , hvor  $\zeta$  er et dimensionsløst modstandstal,  $V$  middelhastigheden i røret ved ventilen og  $g$  tyngdens acceleration,  $9,81 \text{ m/sec}^2$ .

#### Øvelsens forløb

For tre forskellige vandføringer måles sammenhørende værdier af vandføring og tryktab.

#### Forventes afleveret

Beregning af  $\zeta$  og Reynold's tal i de tre tilfælde samt evt. kommentarer.

#### Beregningsskema.

$Q_2 - Q_1$ l	$t$ sec	$Q$ l/s	$v$ m/s	$\Delta P = \Delta H$ m	$\zeta$	Re



DANMARKS INGENIØRAKADEMI  
Bygningsafdelingen  
Aalborg

Laboratoriet for  
Hydraulik og Havnebygning

Laboratoriepraktik 3. halvår

ØVELSEN UDFØRT DATO .....

RAPPORT AFLEVERET DATO .....

NAVN STUDIENUMMER

.....

.....

### Laboratorieøvelse nr. 4.2. Hydraulisk spring

Øvelsens formål:

At foretage en eksperimentel eftervisning af formelen for korresponderende dybder ved hydraulisk spring.

Teoretisk grundlag (se F.A. Engelund "Lærebog i Hydraulik" pag. 139-143).  
Beregningen af de korresponderende dybder foretages på grundlag af impuls-ligningen og kontinuitetsligningen, idet det forudsættes, at hastighedsfordelingskoefficienterne  $\alpha$  og  $\alpha'$  sættes lig 1,0. Herved fås

$$y_B = -\frac{y_A}{2} + \sqrt{\frac{2y_C^3}{y_A} + \frac{y_A^2}{4}},$$

hvor den kritiske dybde  $y_C$  bestemmes af

$$y_C = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}, \text{ hvor } q \text{ er vandføringen pr. breddeenhed af springet.}$$

Øvelsens forløb

I to tilfælde måles dammenhørende værdier af  $y_A$ ,  $y_B$  og vandføringen i renden.

Forventes afleveret

Beregning af  $y_B$  på grundlag af de målte værdier af  $y_A$  og  $q$  og sammenligning med den målte værdi  $y_B$  samt evt. kommentarer.

Beregningsskema.

V flow-meter m/s	$q$ m <sup>3</sup> /sec/m	$y_C$ m	målt $y_A$ m	målt $y_B$ m	beregnet $y_B$ m

Rendens bredde er 1,50 m, og den indre diameter i flowmeter er 0,25 m.

DANMARKS INGENIØRAKADEMI  
Bygningsafdelingen  
Aalborg

Laboratoriet for  
Hydraulik og Havnebygning

Laboratoriepraktik 3. halvår

ØVELSEN UDFØRT DATO .....

RAPPORT AFLEVERET DATO .....

NAVN STUDIENUMMER

.....

.....

### Laboratorieøvelse nr. 4.3. Regelmæssige bølgers refraktion

Øvelsens formål:

At undersøge regelmæssige bølgers refraktion (drejning) på grund af ændringer i vanddybden og sammenholde disse måleresultater med teoretisk beregnede resultater.

#### Måleopstilling

Undersøgelsen foretages i laboratoriets bølgebassin, hvori bunden i den ene del af bassinet er hævet som vist på nedenstående figur. Bølgefronternes drejning måles ved hjælp af to bølgemålere A og B, som søges placeret således, at bølgerne har samme fase ved de to målere. Herefter opmåles bassin og bølgemålere, og de søgte vinkler bestemmes.

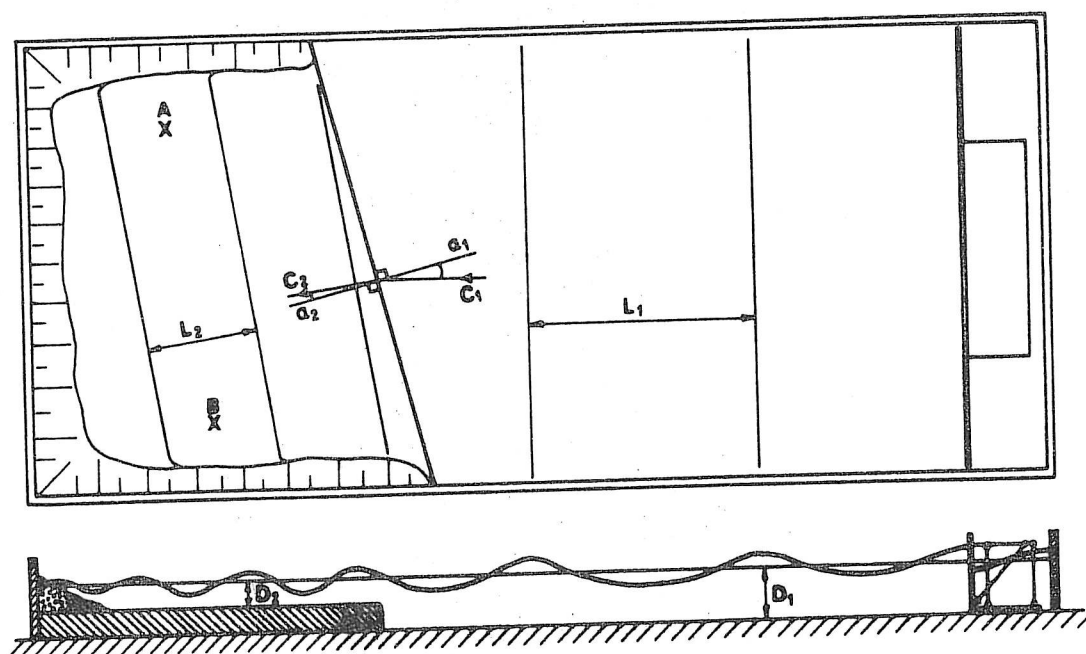


fig. 4.3-1 Plan og snit af opstilling til bestemmelse af refraktion.

Teoretisk grundlag (se evt. H.F. Burcharth og Torben Larsen "Noter til bølgehydraulik").

De grundlæggende bevægelsesligninger for små, regelmæssige overfladebølger er analoge til de tilsvarende ligninger for f.eks. lys- og lydbølger. For refraktion gælder, at bølgefronternes drejning, når bølgerne passerer fra et område med bølgehastigheden  $C_1$  til et område med bølgehastigheden  $C_2$ , kan bestemmes af

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{C_1}{C_2} \quad (1)$$

Bølgehastigheden  $C$  bestemmes af

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi D}{L}\right)}, \quad (2)$$

og  $\frac{C_1}{C_2}$  kan derfor bestemmes direkte ved anvendelse af dette udtryk.

Imidlertid vil det være hurtigere at benytte vedlagte bølgetabel. Følgende omskrivning er dog nødvendig.

Idet  $C = \frac{L}{T}$ , hvor  $T$  er bølgeperioden fås

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{\frac{L_1}{T}}{\frac{L_2}{T}} = \frac{L_1}{L_2} \quad (3)$$

$L_1$  og  $L_2$  kan bestemmes ved hjælp af bølgetabellen, som angiver sammenhængen mellem  $\frac{D}{L_0}$  og  $\frac{D}{L}$ , hvor  $L_0$  er bølgelængden for dybvandsbølger.

Eksempel på bestemmelse af bølgelængden ved hjælp af bølgetabellen:

Givet:  $T = 1,0$  sec og  $D = 0,1$  m.

Først beregnes den til  $T$  svarende bølgelængde på dybt vand

$$L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2 = 1,56 \cdot 1,0^2 \text{ m} = 1,56 \text{ m}$$

Dernæst beregnes  $\frac{D}{L_0} = \frac{0,1}{1,56} = 0,064$ . For denne værdi findes den tilsvarende værdi  $\frac{D}{L} = 0,108$ , hvoraf fås

$$L = \frac{0,1}{0,108} = 0,93 \text{ m}$$

#### Øvelsens forløb

For to forskellige bølgeperioder f.eks. 0,8 og 1,0 sec bestemmes bølgerens refraktion.

#### Forventes afleveret

1. Sammenligning mellem de eksperimentelt bestemte forhold  $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}$  og de tilsvarende teoretisk bestemte forhold  $\frac{C_1}{C_2}$ .
2. Kommentarer til måleresultater og opstilling.

$\frac{D}{L_0}$	$\frac{D}{L}$
0.00	0.0000
01	0403
02	0576
03	0714
04	0833
0.05	0.0942
06	104
07	114
08	123
09	132
0.10	0.141
11	150
12	158
13	166
14	175
0.15	0.183
16	192
17	200
18	208
19	217
0.20	0.225
21	234
22	242
23	251
24	259
0.25	0.268
26	277
27	285
28	294
29	303
0.30	0.312
31	321
32	330
33	339
34	349
0.35	0.358
36	367
37	377
38	386
39	396
0.40	0.405
41	414
42	424
43	434
44	443
0.45	0.453
46	463
47	472
48	482
49	492
0.50	0.502



### Vurdering

På trods af øvelsernes korte varighed og elementære indhold, samt at det primære formål, som tidligere beskrevet, ikke er at lære hydraulik, men at få en fornemmelse for og lidt indsigt i laboratoriearbejde, er det dog vort indtryk, at de studerende, som har valgt at udføre øvelserne, føler, at de har haft et positivt udbytte.

En væsentlig kritik, som de studerende fremførte, er, at varigheden af den enkelte øvelse (4 timer incl. bearbejdning og udarbejdelse af kommentarer) er for kort. De studerende mener, at det er vanskeligt at indleve sig i en ny problemstilling på en enkelt eftermiddag. I konsekvens heraf vil vi formentlig næste år forsøge at tilbyde de samme øvelser i et udvidet omfang, men til gengæld strækkende sig over 6 eftermiddage mod nu 4.

Tidligere udkomne bulletiner:

Bulletin nr. 1      H. F. Burcharth og Torben Larsen  
                         "Introduktion af laboratoriet" december 1971.